



化学的エネルギーの直接変換により運動する機能性 マイクロ／ナノモータの構築

著者	吉積 義隆
内容記述	この博士論文は内容の要約のみの公開（または一部非公開）になっています
発行年	2017
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2016
報告番号	12102甲第8034号
URL	http://hdl.handle.net/2241/00148208

数理物質科学研究科 博士論文の要約

専攻名	ナノサイエンス・ナノテクノロジー専攻
学籍番号	201430112
学生氏名	吉積 義隆
学位名	博士（工学）
指導教員	鈴木 博章

博士論文題目

化学的エネルギーの直接変換により運動する機能性マイクロ／ナノモータの構築

要旨

筋肉のダイナミックな動きを生み出し細胞内での物質輸送を担うアクチン・ミオシンや、体内のエネルギー通貨である ATP を合成・分解する F 型 ATP アーゼ等、生体中には目を見張るほどに巧緻なナノマシンが数多く存在する。このような天然のナノマシンの生体的な特徴を模倣し、自発的・自律的動作を行うマイクロ／ナノスケールの微小デバイスを実現する試みが、半導体微細加工技術等を援用することにより近年盛んになされている。

本博士論文では、高度な機能を発現する天然マイクロ／ナノマシンを特に電気化学的側面から模倣するアプローチによって、バイオツールとして応用可能な微小な人工モータを構築し、これへの高度な機能性の付与を試みた。有用な人工マイクロモータの構築にあたっては、モータの材料・燃料の生体毒性問題や、運動制御手法の確立等、克服すべき課題が多いが、以下に述べるアプローチによって課題解決を図ることによって、新たな機能性の創出を試みた。

まず、低濃度のアルコールという穏和な燃料中で電気化学的反応を利用して駆動する亜鉛／白金接合型マイクロモータを構築し、磁力による運動方向制御を試みた。このモータは、スパッタリングにより形成された亜鉛層と白金層により半面ずつが被覆された直径 5 μm の球状構造をとる。亜鉛／白金マイクロモータは、100 mM メタノールを含む水溶液中を駆動する。また、亜鉛層の下にニッケル層を設置すると、磁力を用いてマイクロモータの姿勢を制御できる。これを利用してマイクロモータの運動方向制御を行うことに成功した。

また、同じく亜鉛／白金マイクロモータを用いることによって、細胞運搬を可能とするシステムを提案した。1-デカンチオール単分子層を形成し白金表面を疎水性とした亜鉛／白金マイクロモータは、疎水相互作用により大腸菌を捕獲することができ、それらを生きたままの状態で運搬することができた。さらに、亜鉛の強い還元力 ($< -0.7\text{ V vs. SHE}$) を利用した白金-硫黄結合部位の還元脱離機能の付与を試みた。亜鉛の酸化溶出反応とチオールの還元脱離反応が同時進行するようにモータ表面の混成電位を調整することによって、捕獲した大腸菌を脱離させることに成功した。

次に、微小電極上で発生させた局所的な交流電場を用いた、マイクロモータの運動方向制御システムを確立した。マイクロモータをバイオツールとして扱うにあたって、それ自身の運動（位置）を制御できる利点は大きい。そこで、微小流体デバイス内に生じさせた交流電場のアシストによる運動方向・領域を制御するシステムを構築した。この微小流体デバイス中には、電極がライン状、あるいは格子状にパターンされている。ここに交流電圧を印加すると、電極近傍に交流電気浸透流が生じるとともに、金属からなるマイクロモータは正の誘電泳動力を受ける。これら流体流れと誘電泳動力により、モータは電極上にトラップされるが、依然として 1 次元方向に動く自由度を有するため、電極ラインに沿った自発的駆動力による運動を行う。このようなアプローチを用いて、1 次元的控制、2 次元的控制を行うことに成功した。

マイクロモータのさらなる高機能化を目指し、複数のマイクロモータの複合化手法の確立を試み、自己伸張や回転挙動を示す複合型マイクロモータの構築を行った。2 本の剛直な白金／金マイ

クロロッドを柔軟な有機材料のジョイントで繋ぐことで、周囲の溶液環境に応じて回転運動といった高次な運動挙動を示す連結型マイクロモータの構築を試みた。ジョイントは複合高分子膜からなるチューブ状構造となっており、連結部の化学処理により、連結型マイクロモータの開き角が制御される。白金／金 - 金／白金連結型マイクロモータについては、燃料溶液中で構造が「開く」運動が観察された。また、白金／金 - 白金／金連結型マイクロモータについては、燃料となる 1 M 過酸化水素溶液中で回転運動を示した。さらに、この円運動の軌跡の半径は開き角に依存して変化することが確認された。

このような、様々な機能性を有するマイクロモータの構築は、微小物体の精密操作等の為の微小デバイスの開発につながる要素技術となることが期待される。今後、さらなる高機能化を試みられるとともに、マイクロモータの有用性が検討されていくことを期待するものである。

第 1 章 緒言

マイクロ／ナノマシン開発に向けた研究の端緒から現在の動向までを概説した。未だ発展途上にあるマイクロ／ナノモータ構築の現状⁽¹⁻²⁾を述べ、解決すべき課題を明らかにすることで本研究の背景について述べた。本研究の設定課題として以下の 4 点を提示した。

- ① マイクロモータを構成する材料や燃料物質の毒性の問題の解決
- ② 対象物体の捕獲・運搬・脱離を自発的に行わせる機能の構築
- ③ 簡便な装置によるマイクロモータの運動方向制御手法の提案
- ④ 単純な並進運動以上の高度な運動挙動の実現

以上のような課題を解決し、より高機能なマイクロモータを実現するための新規アプローチを提案することが本研究の目的となる。

第 2 章 穏和な環境下で駆動するマイクロモータの構築と運動性評価⁽³⁾

将来的に生体内で自律動作を行う多機能なロボットを実現する為には、穏和な環境下で周囲の化学的エネルギー等を運動エネルギーに変換するシステムが求められる。そこで、本章では穏和な環境下でのエネルギー変換を目指すべく、金属の腐食反応という日常的に見られる 1 電極反応に着目した。金属の腐食反応過程において形成される局部電池周囲には、局所的なイオンの濃度勾配が生じる。その局所的イオン濃度勾配（電位勾配）形成によって生じる電気浸透流を運動エネルギーとして取り出す亜鉛／白金 (Zn/Pt) モータの作製を試みた。ここでは標準電極電位の低い（還元力の強い）亜鉛 ($E^\circ = -0.762 \text{ V vs. SHE}$) の使用により、メタノールのようなアルコールをも燃料として使用可能であることが期待される。また、本マイクロモータに対する機能化の一環として、強磁性材料を組み込むことで外部磁場による駆動方向制御の試みについて触れる。

【実験】

本モータは、真空蒸着法及びスパッタリング法により形成された亜鉛層と白金層により半面ずつが被覆された球状構造をとる (Figure 1)。作製に際しては、まず直径 5 μm のポリスチレンビ

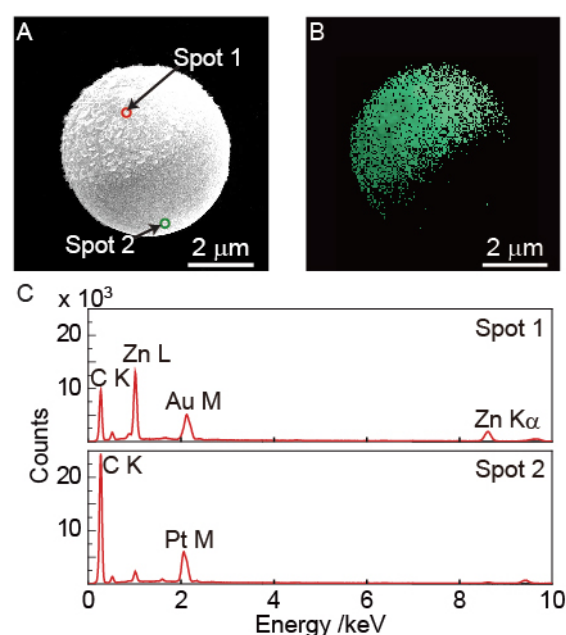


Figure 1 作製した Zn/Pt マイクロモータ。(A) 走査電子顕微鏡 (SEM) 像。(B) エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) により得られた亜鉛原子のマッピング像。(C) (A) 内の Spot 1、Spot 2 における EDX スペクトル。

ーズの全面にスパッタリング法を用いて白金薄膜（50 nm）を形成した。続いて、半球面上にのみ真空蒸着法により金（50 nm）、亜鉛（300 nm）の順に薄膜層を形成した。運動性評価に際しては、カバーガラスとスライドガラスを厚さ 130 mm のスペーサを介して貼り合わせた観察チャンバを使用した。この観察チャンバに作製したマイクロモータ、及び燃料となるメタノール、*p*-ベンゾキノン水溶液を封入した。マイクロモータの運動挙動を動画撮影し、その軌跡を画像解析ソフトウェア ImageJ によって解析した。

【結果・考察】

Zn/Pt マイクロモータの運動挙動について、濃度の異なる燃料水溶液中で観察を行った。Figure 2A に 0.3 wt% メタノール水溶液中での運動軌跡を示す。Zn/Pt マイクロモータの自発駆動は、ブラウン運動とは異なるものであることが分かった（Figure 2A）。同様の運動挙動が *p*-ベンゾキノン水溶液においても確認された。比較として、Au/Pt ビーズの 0.3 wt% メタノール水溶液中での運動軌跡を示す（Figure 2A）。この場合、メタノールを還元するための適切な物質が存在しないため、ビーズはほとんど動くことが無かった。100 mM メタノール、100 mM *p*-ベンゾキノン水溶液における Zn/Pt マイクロモータの平均運動速度は、それぞれ $0.13 \pm 0.03 \mu\text{m/s}$ ($n = 50$)、 $0.15 \pm 0.02 \mu\text{m/s}$ ($n = 50$) であった。モータ上にはたらく推進力 F_{prop} はストークスの式によって計算される流体抵抗と釣り合うことから、 $F_{\text{prop}} = 6\pi\eta av$ により計算できる。ここで、 η は溶液の粘度、 a はモータの半径、 v はモータの平均速度である。この式から 100 mM メタノール水溶液内での Zn/Pt マイクロモータの推進力は、およそ 4 fN と求められた。

Zn/Pt マイクロモータの運動速度の燃料濃度依存性を Figure 2B、C に示す。速度はメタノール、*p*-ベンゾキノンの濃度の増加に伴って上昇した。水溶液中の酸化体（燃料）が白金上で還元されたとき、電子は亜鉛から白金へ流れなければならない。実際にこの電子の流れが生じているのかを確かめるために、マクロスケールの亜鉛、白金平面電極間に流れる短絡電流を測定した（Figure 2B、C）。電流値はメタノール、*p*-ベンゾキノンの濃度の増加に伴って上昇し、速度に対して得られた依存性と同様の依存性が確認された。

第 3 章 細胞輸送・脱離機能を有するマイクロモータの構築⁽³⁾

単一細胞のマニピュレーションと解析の必要性はこの 10 年で飛躍的に高まり、細胞工学・組織工学等への応用が期待されている⁽⁴⁻⁶⁾。単一細胞を取り扱う技術として、マイクロマニピュレータ、

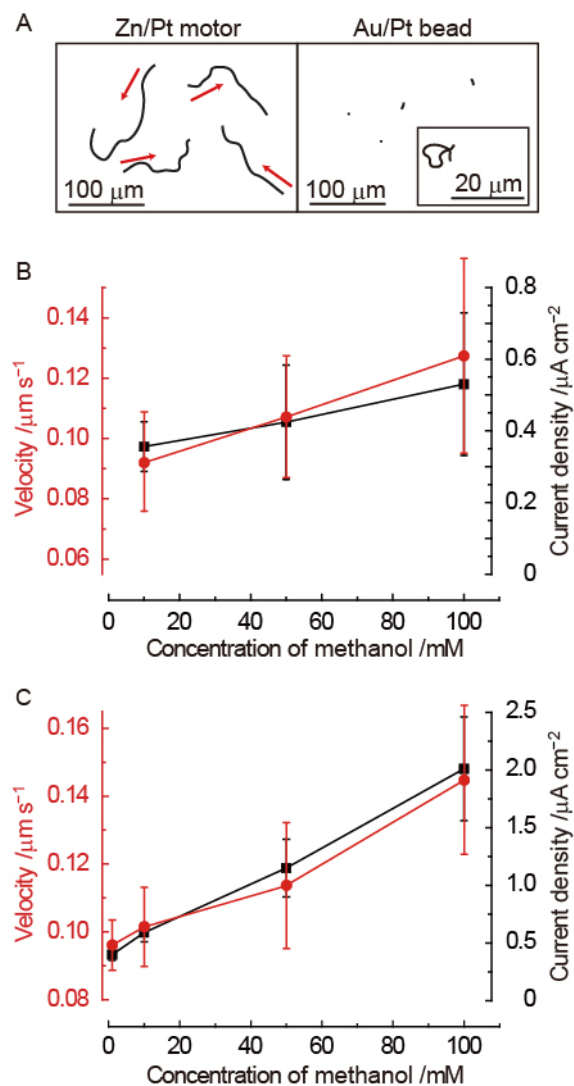


Figure 2 Zn/Pt マイクロモータの運動。(A) 100 mM メタノール水溶液中での Zn/Pt マイクロモータ（左、5 分間）と Au/Pt ビーズ（右、10 分間）の運動軌跡。(B、C) メタノール水溶液 (B) と *p*-ベンゾキノン水溶液 (C) における Zn/Pt マイクロモータの運動速度（赤）とマクロスケール亜鉛、白金電極（各々 4.4 cm²）間の定常短絡電流密度（黒）の燃料濃度依存性。電流値の測定は電極を短絡して 180 秒経過後に行った。エラーバーは速度 ($n = 50$) と電流値 ($n = 10$) の標準偏差を表す。

光ピンセット、動電的システムやマイクロフレイディックデバイスが報告され既に広く使用されているが、外部装置が煩雑であるなど取り扱いに関して改善の余地が残される。この点で、マイクロ／ナノモータはそれ自身が自分で駆動する能力を備えており、機能付与が可能であることから利点があるものと考えられ、効率的な化学分析等を行うための有用なツールとなりうる。第2章において得られた Zn/Pt モータについても、これに要求される一つの重要な機能は、物体あるいは分子の運搬である。そこで、本章では生きた大腸菌 (*Escherichia coli* (*E. coli*)) 細胞を自動的に運搬・脱離する新手法の提案を行った。前章で作製した Zn/Pt マイクロモータにアルカンチオール自己組織化単分子膜 (self-assembled monolayer (SAM)) 修飾し、非特異的吸着による細胞の捕獲を行った。亜鉛の高い還元力 (負の大きな酸化還元電位) を利用して、修飾した SAM を脱離させることが本モータのポイントである。SAM の脱離と同時に SAM 上の *E. coli* を脱離させるのである。

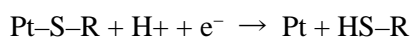
【実験】

モータ表面での SAM 及び *E. coli* の吸着・脱離挙動を評価するために、Zn/Pt 複合電極を作製した。Zn/Pt 複合電極に対して 1-デカンチオールの修飾を行った。10 μM の 1-デカンチオール (あるいは 10 μM の 1-ヘキサチオール) を含む 1.0 mM の ZnCl_2 エタノール溶液を複合電極を浸漬し 30 分静置することで白金表面を疎水化した。その後、エタノール、純水の順で複合電極を洗浄した。OD₆₀₀ = 1.0 相当濃度の *E. coli* を含む 1.0 mM の ZnCl_2 水溶液に、白金電極側を疎水化した Zn/Pt/SAM 複合電極を 15 分間浸漬させることで *E. coli* を吸着させた。1.0 mM の ZnCl_2 水溶液で洗浄後、複合電極を 1.0 mM の ZnCl_2 水溶液に浸漬し、5 分ごとに 1.0 mM の ZnCl_2 水溶液を流し込み、白金表面上の *E. coli* 吸着密度を光学顕微鏡下で計測した。続いて、複合電極を純水に浸漬し、同様に 5 分ごとに純水を流し、脱離した *E. coli* を洗い流した後の白金表面上の *E. coli* 数密度を計測した。同様の測定を 100 mM メタノール水溶液についても行った。

続いて、Zn/Pt 複合電極の場合と同様の手順で、Zn/Pt マイクロモータの白金面に対して 1-デカンチオールの修飾を行った。7740g で 10 秒間遠心することで、液体をエタノールに交換する作業を 3 回繰り返した。続いて、OD₆₀₀ = 1.0 相当濃度の *E. coli* を含む 1.0 mM の ZnCl_2 水溶液にマイクロモータを分散させ、15 分間浸漬させた。その後、7740g で 10 秒間遠心してマイクロモータを取り出し、すぐさま 100 mM メタノール水溶液に分散させ、観察用チャンバに封入した。

【結果・考察】

対象細胞の自動的な捕獲・輸送・脱離は、マイクロモータに修飾したアルカンチオール SAM への疎水相互作用を介した *E. coli* の吸着と、自発進行する SAM の還元的脱離による *E. coli* 脱離の組み合わせにより実現される。自動的な *E. coli* 脱離は、混成電位のシフトによって説明される。Figure 3A に亜鉛の酸化とアルカンチオールの還元



についての分極曲線を図示した。ここで、R は炭素鎖を表す。混成電位は全ての酸化還元反応に由来する酸化電流と還元電流の合計がゼロになる電位として定義される。1-デカンチオールによって形成された Zn/Pt/SAM 複合電極は約 -0.9 V (vs Ag/AgCl) の混成電位を示す。SAM を構成するアルカンチオールはこの電位で還元的に脱離するが、溶液中に Zn^{2+} イオンが存在すると Zn^{2+} イオンの還元によって混成電位の正方向へのシフトが生じる (Figure 3B)。言い換えれば、 Zn^{2+} イオンが SAM の脱離を抑制するということである。燃料としてのメタノールが存在する状況を表したのが Figure 3C である。ここで、チオールの脱離と Zn/Pt マイクロモータを駆動させるメタノールの還元反応が同時に生じている。つまり、溶液組成と濃度を適切に変化させることで細胞の捕獲・運搬・脱離を制御できることを示している。

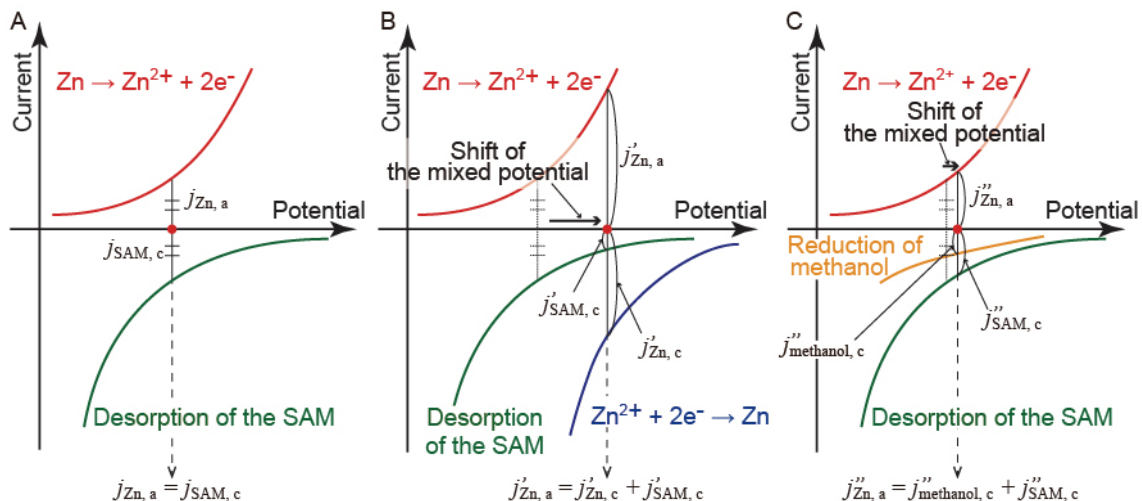


Figure 3 Zn/Pt/SAM マイクロモータの混成電位の変化。混成電位は赤点によって示されている。(A) 亜鉛の溶出と SAM の還元脱離についての分極曲線。(B) (A) に Zn^{2+} イオンを加えた時の分極曲線。このとき混成電位が正に移動し、本実験の時間スケールにおいては SAM の脱離が抑制される。(C) メタノールが存在し、かつ Zn^{2+} イオンが存在しない状況での分極曲線。亜鉛溶出 (赤線)、SAM 脱離 (緑線)、メタノールの還元 (橙線) に対する電流の合計が 0 となるように混成電位が規制される。

上述したように、 Zn^{2+} イオンは混成電位を正にシフトさせ、見かけ上の亜鉛の酸化溶出反応と SAM の還元脱離反応の反応率を減少させる。このような条件下で、*E. coli* が実際に Zn/Pt/SAM マイクロモータに捕獲されることが確認された。続いて、 Zn^{2+} イオンを除去し *E. coli* を含む 100 mM のメタノール水溶液 (Zn^{2+} イオンを含まない) に浸漬すると、Zn/Pt/SAM マイクロモータは捕獲した *E. coli* を引き連れて直線的な軌跡を描く運動を見せた (Figure 4A, B)。さらに、 12 ± 1 分後にマイクロモータからの *E. coli* の脱離が確認された ($n = 5$, Figure 4C)。この結果から、チオールの還元脱離はマイクロモータの駆動のためのメタノールの還元と共存可能であることが分かる。

第4章 簡便な外部装置による交流電場を用いた運動方向制御システムの構築⁽⁷⁾

個々のマイクロ/ナノモータの個別的な位置の精密制御は困難な課題として残されている。これまで、磁場等の外部力場を利用したマイクロ/ナノモータの運動制御が報告されてきた⁽⁸⁻⁹⁾。しかし、一般的に外部的な力場がマイクロ/ナノモータの構造より非常に大きいため、集団を一括して制御することはできるが、個々のマイクロ/ナノモータを個別的に制御することは困難である。もし制御しようとするれば、非常に精密な外部力場の操作、または、マイクロモータの構造自体の精密な制御が必要となる可能性がある。

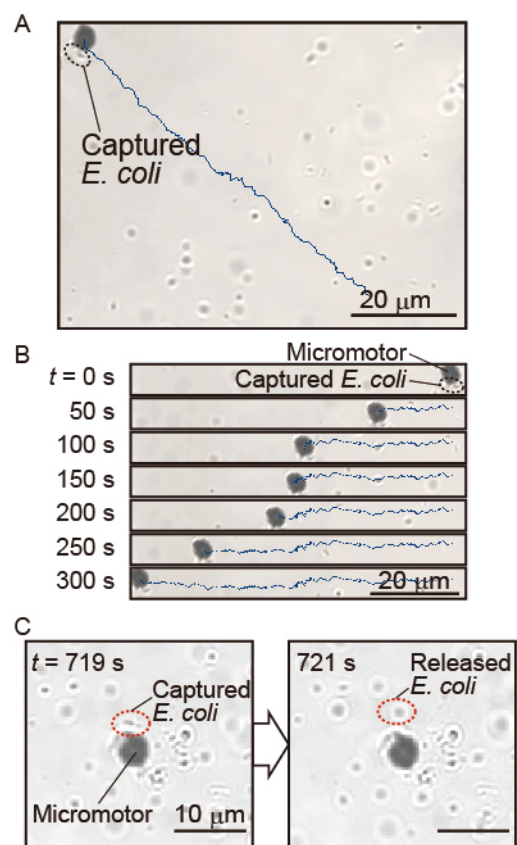


Figure 4 *E. coli* の運搬と脱離。(A) SAM により *E. coli* を捕獲した Zn/Pt/SAM マイクロモータの 100 mM メタノール水溶液中での運搬運動の軌跡。(B) (A) についての 50 秒ごとのタイムラプス画像。(C) Zn^{2+} イオン除去後 720 秒において観察された *E. coli* の脱離。

そこで、本章では自発駆動型球状マイクロモータの2次元的な個別的運動制御の試みについて述べる。力場としては、マイクロフルイディックデバイス内に設置した電極上で発生させる交流電場起因する交流電気浸透流 (ACEO) と正の誘電泳動 (pDEP) を利用した。マイクロモータとしては、白金/金 (Pt/Au) 接合型ヤヌスマイクロモータを使用した。電極を格子状に配置することで、多軸マニピュレータのような外部装置を必要とせずマイクロモータの自発駆動を個別的に制御することができる。

【実験】

ここでは Pt/Au マイクロモータを使用した。作製方法は第2章のマイクロモータの場合と同様である。本実験では透明電極のパターンを有するマイクロフルイディックデバイス内で、マイクロモータの挙動を観察した。本デバイスは、スペーサー (流路) としての SU-8 層が、インジウム・スズ酸化物 (ITO) 透明電極のパターンを有するスライドガラスで挟まれた構造となっている。形成した流路の断面の寸法は $500\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ であり、ITO 電極 (厚み $150\ \text{nm}$) はサンプル溶液とじかに接触する。また、電極パターンは外部交流電源に接続されており、リレー回路を組み合わせた電極切替回路によりソフトウェア上で通電させる電極を任意に制御した。

【結果・考察】

1 M 過酸化水素水溶液を満たしたデバイスにおいて、マイクロモータが自発駆動によるランダムな軌跡を描いている状態で、 $1\ \text{kHz}/8\ \text{V}_{\text{p-p}}$ の交流電場を印加した。その結果、交流を印加した電極の中央線にマイクロモータが1秒以内にはき寄せられると同時に、電極に沿った自発運動が観察された。これは Figure 5A に模式的に示すように、ACEO と pDEP によるマイクロモータの駆動域が電極軸方向に1次元的に制約されると同時に、マイクロモータの自発駆動方向がこの軸を向いた結果として生じたものと考えられる。観察された1次元的な運動の軌跡を Figure 5B に示す。ここでは、一視野内の3個のマイクロモータが、 $1\ \text{kHz}/8\ \text{V}_{\text{p-p}}$ の交流が印加された3本の電極ライン上を1次元的に運動する様子を捉えた。

1次元運動制御で用いたのと同様の ACEO

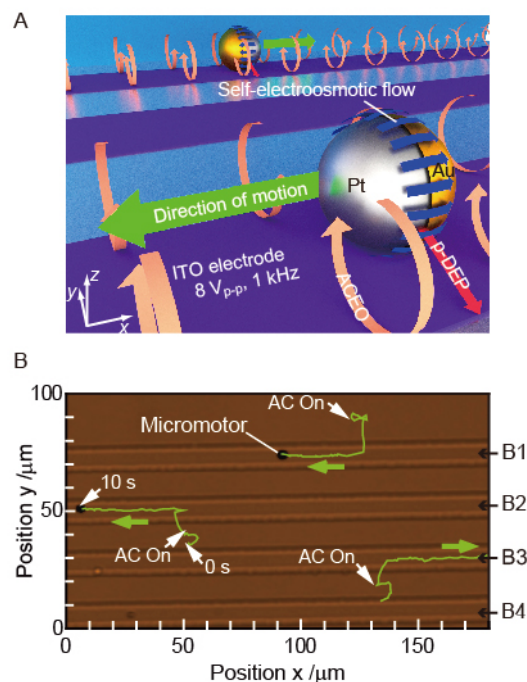


Figure 5 Pt/Au マイクロモータの1次元方向の運動制御。

(A) 下面にのみ平行電極パターンを有するデバイス内における ACEO/pDEP によるマイクロモータの運動挙動制御の模式図。(B) 電極に $1\ \text{kHz}$ 、 $8\ \text{V}_{\text{p-p}}$ の交流電場を印加した際のマイクロモータの運動軌跡。

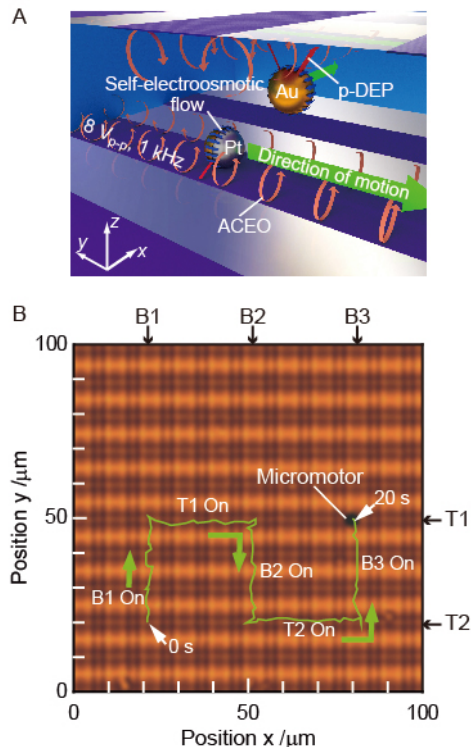


Figure 6 Pt/Au マイクロモータの2次元方向の運動制御。

(A) 上下面に互いに直行する平行電極パターンを有するデバイス内における ACEO/pDEP によるマイクロモータの運動挙動制御の模式図。(B) 電極に $1\ \text{kHz}$ 、 $8\ \text{V}_{\text{p-p}}$ の交流電場を印加し、次々に切り替えた際のマイクロモータの運動軌跡。

と pDEP の組み合わせによる方法を用いることで、格子状電極デバイス内での 2 次元運動制御を試みた。Figure 6A は制御の様子を模式的に示したものである。マイクロモータの 2 次元的な方向転換は、交流電場を印加する電極を次々に切り替えていくことで達成された (Figure 6B)。初めに下面ライン電極 (y 軸と平行) に交流電場を印加していた場合、方向転換したい箇所で交差する上面ライン電極 (x 軸と平行) に交流電場を切り替えると方向転換が観察された。

第 5 章 有機／無機ハイブリッド構造を有する自己伸張・回転型マイクロモータの構築

天然の生体システムに注目すると、その複雑な機械的運動は、単純な自発運動を行う基本構造の組み合わせで成り立っている⁽¹⁰⁾。これによって、自らが変形する運動や回転運動といった多様な非並進運動を行うことができる。

そこで本章では、このような天然の生体システムの構造に着目し、非並進運動を示す自発駆動マイクロモータの作製面での検討について述べる。作製したマイクロモータは、エンジンとしての 2 個の Pt/Au ロッド型マイクロモータと、layer-by-layer (LbL) 法により作製したポリマージョイントより構成される。ポリマージョイントの柔軟性はポリマー層の厚みで制御され、平衡状態での屈曲角は熱的・化学的処理によって調整できる。本章では、屈曲した Pt/Au-Au/Pt、Pt/Au-Pt/Au 構造を用いた変形運動、及び回転運動の実現を試みた結果について述べた。

【実験】

本複合型マイクロモータは、LbL 法により形成されたポリアクリル酸 (PAA)、ポリアリルアミン塩酸塩 (PAH) からなるポリマー二重層チューブ ((PAA/PAH) \times n , n は二重層の層数) (ジョイント部) と電解めっきにより形成された Pt/Au マイクロロッド (モータ部) から構成される。複合型マイクロモータの作製は、直径 200 nm の細孔が規則正しく並んだ陽極酸化ポーラスアルミナをテンプレートとして、その細孔内部で行った。

【結果・考察】

1.0 M 過酸化水素水溶液中において、屈曲した柔らかいジョイント ((PAA/PAH) \times 1, $\theta \approx 150^\circ$) を有する Pt/Au-Au/Pt マイクロモータの挙動を観察した。燃料溶液中での屈曲したジョイント ((PAA/PAH) \times 1) を有する Pt/Au-Au/Pt マイクロモータの伸長運動が直接観察された。

さらに、伸長運動に加え、マイクロモータの結合順を変更し (Pt/Au-Au/Pt \rightarrow Pt/Au-Pt/Au)、硬いジョイント ((PAA/PAH) \times 5) を用いることで回転運動が観察された。

第 6 章 総括

本博士論文では、様々な機能性を有するマイクロモータの構築は、微小物体の精密操作等の為の微小デバイスの開発につながる要素技術の構築について述べた。しかしながら、Zn/Pt モータを始めとするマイクロモータの駆動原理について、未だ不明瞭な点が多いのが現状である。ミクロレベルでの物質移動の様子や、その物質移動がいかにして運動を引き起こすのかが今後の研究において明らかなることを期待する。これが明らかになることでマイクロスケールにおける物理的挙動に関する理解が深まり、将来的には生体物質を燃料とするマイクロ／ナノモータの開発やそれらのさらなる機能化につながると考えられる。

参考文献

- (1) Wang, H.; Pummer, M. Fabrication of Micro/Nanoscale Motors. *Chem. Rev. (Washington, DC, U. S.)* **2015**, *115*, 8704-8735.
- (2) Wang, W.; Duan, W. T.; Ahmed, S.; Mallouk, T. E.; Sen, A. Small Power: Autonomous Nano- and Micromotors Propelled by Self-Generated Gradients. *Nano Today* **2013**, *8*, 531-554.

- (3) Yoshizumi, Y.; Okubo, K.; Yokokawa, M.; Suzuki, H. Programmed Transport and Release of Cells by Self-Propelled Micromotors. *Langmuir* **2016**, *32*, 9381-9388.
- (4) Lu, X.; Huang, W. H.; Wang, Z. L.; Cheng, H. K. Recent Developments in Single-Cell Analysis. *Anal. Chim. Acta* **2004**, *510*, 127-138.
- (5) Todd, R.; Margolin, D. H. Challenges of Single-Cell Diagnostics: Analysis of Gene Expression. *Trends Mol. Med.* **2002**, *8*, 254-257.
- (6) Lutolf, M. P.; Hubbell, J. A. Synthetic Biomaterials as Instructive Extracellular Microenvironments for Morphogenesis in Tissue Engineering. *Nat. Biotechnol.* **2005**, *23*, 47-55.
- (7) Yoshizumi, Y.; Honegger, T.; Berton, K.; Suzuki, H.; Peyrade, D. Trajectory Control of Self-Propelled Micromotors Using AC Electrokinetics. *Small* **2015**, *11*, 5630-5635.
- (8) Wang, J. Can Man-Made Nanomachines Compete with Nature Biomotors? *ACS Nano* **2009**, *3*, 4-9.
- (9) Sanchez, S.; Soler, L.; Katuri, J. Chemically Powered Micro- and Nanomotors. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2015**, *54*, 1414-1444.
- (10) Shingyoji, C.; Higuchi, H.; Yoshimura, M.; Katayama, E.; Yanagida, T. Dynein Arms Are Oscillating Force Generators. *Nature* **1998**, *393*, 711-714.

投稿論文リスト

1. Yoshizumi, Y.; Honegger, T.; Berton, K.; Suzuki, H.; Peyrade, D. Trajectory Control of Self-Propelled Micromotors Using AC Electrokinetics. *Small* **2015**, *11* (42), 5630-5635.
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.langmuir.5b04206>
2. Yoshizumi, Y.; Yokokawa, M.; Suzuki, H. In *Self-Deformable Micro/Nanomotors with Organic-Inorganic Hybrid Structures*, 2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), Sendai, JAPAN, April 17-20; **2016**, pp 275-278. (国際会議 Proceedings paper)
3. Yoshizumi, Y.; Okubo, K.; Yokokawa, M.; Suzuki, H. Programmed Transport and Release of Cells by Self-Propelled Micromotors. *Langmuir* **2016**, *32* (37), 9381-9388.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sml.201501557/full>